

INTERFAZ INTELIGENTE PARA SENSORES DE BAJO COSTE EN APLICACIONES PORTÁTILES PARA INTELIGENCIA AMBIENTAL

MEMORIA DEL PROYECTO

Autor:

José Olásolo Alonso

Director:

Nicolás Medrano Marqués

Ponente:

Julián Fernández Navajas

Septiembre 2010



Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Ingeniería Superior de Telecomunicación
Especialidad Electrónica
Centro Politécnico Superior
C/ María de Luna nº3
50018 Zaragoza España

INTERFAZ INTELIGENTE PARA SENSORES DE BAJO COSTE EN APLICACIONES PORTÁTILES PARA INTELIGENCIA AMBIENTAL

RESUMEN

El proyecto fin de carrera está enmarcado dentro del proyecto GA-LC-039/2008 del I3A, desarrollado por el GDE de la universidad de Zaragoza. En él se pretende diseñar y desarrollar una red inalámbrica de sensores para la prevención y detección temprana de incendios.

La inteligencia ambiental es un concepto que cada vez se está convirtiendo en más relevante. Ésta involucra crear entornos que reaccionen ante cambios facilitando la interacción del ser humano con el medio. Por ello los sensores se convierten en parte fundamental de la inteligencia ambiental. El proyecto fin de carrera consiste en el diseño de un interfaz hardware para el acondicionamiento de diferentes tipos de sensores, compatible con las necesidades y restricciones de los nodos de una red sensorial inalámbrica y con el objetivo de ser integrado dentro de un nodo sensor de la red inalámbrica de sensores desarrollada por el GDE. El interfaz posee un microcontrolador que tiene una pequeña memoria donde se almacenen las características y propiedades relevantes del sensor, necesarias para su acondicionamiento, medida, calibración y en su caso compensación, formando un reducido *datasheet* electrónico. El microcontrolador se encarga de gestionar toda la electrónica del interfaz en función del tipo de sensor y además implementa las comunicaciones con el exterior siguiendo el protocolo I2C. El interfaz sigue con la filosofía *plug&play* en la conexión con el nodo sensor, minimizando la interacción del usuario.

Una vez diseñado el interfaz se aplican diferentes tipos de sensores para demostrar la validez del mismo y se prueba su funcionamiento como parte del nodo de la red inalámbrica de sensores comprobando el correcto funcionamiento del sistema final.

ÍNDICE

MEMORIA

<u>1</u>	<u>DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</u>	<u>11</u>
1.1	INTRODUCCIÓN	11
1.2	ESTADO DEL ARTE	12
1.3	CONTEXTO	14
1.4	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	14
1.5	OBJETIVOS	15
1.6	DOCUMENTACIÓN APORTADA	16
<u>2</u>	<u>DISEÑO DEL INTERFAZ</u>	<u>17</u>
2.1	DISEÑO HARDWARE	17
2.1.1	SENSOR DE TEMPERATURA : NTC	18
2.1.2	PLATAFORMA PARA LOS SENSORES	19
2.1.3	BLOQUE DE AMPLIFICACIÓN	22
2.1.4	CONVERSIÓN TENSIÓN FRECUENCIA	25
2.1.5	BLOQUE DE CONTROL	26
2.1.6	ALIMENTACIÓN	27
2.2	MICROCONTROLADOR Y SOFTWARE	28
2.2.1	PROTOCOLO DE COMUNICACIONES	29
2.2.2	ESTRUCTURA DE LAS MEMORIAS	31
2.2.3	COMANDOS	32
2.2.4	ESTRUCTURA DEL PROGRAMA	35
2.3	SENSORES APLICADOS	36
<u>3</u>	<u>RED INALÁMBRICA DE SENSORES</u>	<u>39</u>
3.1	INTRODUCCIÓN	39
3.2	ESTRUCTURA DEL NODO	40
3.3	TOPOLOGÍA DE LA RED	41

3.4	INTEGRACIÓN DEL INTERFAZ EN LA RED	42
4	RESULTADOS	45
4.1	ERRORES	45
4.2	CONSUMO	47
5	CONCLUSIONES	49
5.1	CONCLUSIONES DEL PROYECTO	49
5.2	PROPUESTAS DE MEJORA	50
5.3	CONSIDERACIONES PERSONALES	51
6	PLANIFICACIÓN TEMPORAL	53
7	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES	55
8	ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	57
ANEXO A. CÁLCULOS DE LA GANANCIA Y EL OFFSET		61
ANEXO B. DISTRIBUCIÓN DE LAS SEÑALES DE CONTROL DEL INTERFAZ		63
ANEXO C. PROTOCOLO I2C		71
ANEXO D. SENSORES APLICADOS		81
ANEXO E. TIPOS DE VARIABLES		89
ANEXO F: FORMATO DE LA TRAMA DE LA WSN		91

MEMORIA

1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha ido ganando importancia el término inteligencia ambiental (IA). Este supone la creación de entornos inteligentes que se adapten a las necesidades de los seres humanos, es decir, entornos que midan magnitudes físicas del medio, que reaccionen ante sus cambios de forma que faciliten la interacción del ser humano con el medio. Estas magnitudes físicas son medidas gracias a sensores o transductores, por lo que estos se convierten en parte esencial de la IA.

Los sensores son capaces de reaccionar ante cambios de magnitudes físicas, provocando variaciones en magnitudes que pueden ser detectadas en un circuito electrónico (Resistencia, Capacidad, Inductancia, Voltaje e Intensidad). Para ser convenientemente procesadas, estas magnitudes han de convertirse en variaciones de voltaje o de intensidad (si no lo son ya); además, la mayoría de los sensores comerciales de bajo coste suelen tener valores de salida muy pequeños, pudiendo en ocasiones presentar problemas de adaptación de impedancias o linealidad, por lo que la gran mayoría de sensores necesita circuitos de acondicionamiento electrónico.

Los circuitos de acondicionamiento, dependen del tipo de sensor. En algunas ocasiones se necesitará circuitos resistivos, capacitivos, de amplificación o incluso puentes de wheatstone y amplificadores de instrumentación cuando los sensores sean diferenciales. Así una buena idea sería tener un interfaz hardware genérico que pudiera ser compatible con muchos tipos de sensores y que dependiendo del tipo de sensor se configure automáticamente formando el circuito de acondicionamiento necesario para ese sensor concreto.

Las redes inalámbricas de sensores (WSN) se pueden englobar dentro del campo de la inteligencia ambiental. Una WSN es un conjunto de nodos (o motes), que están dotados de una serie de sensores y de capacidad de comunicación inalámbrica. Los valores de las medidas de los sensores son transmitidos hasta el nodo central o coordinador mediante técnicas multi-salto. Este nodo suele estar conectado a un PC donde se procesan todos los datos y se monitoriza el estado de todos los nodos.

Una característica fundamental de las WSN es que los nodos son portátiles, lo que conlleva que la alimentación es por batería y por ello se debe minimizar el consumo del nodo. De esta forma, si se pretende integrar el interfaz genérico propuesto en un nodo de la red inalámbrica de sensores, deberá ser diseñado bajo las especificaciones de bajo consumo y baja tensión.

Plug&play es la tecnología que permite a un dispositivo electrónico conectarse a un PC o una unidad de procesamiento sin necesidad de que el usuario tenga que realizar ningún tipo de configuración. Si queremos que el interfaz propuesto sea conectable *plug&play* con los motes sensores, es necesario que dicho interfaz posea una memoria con información acerca del sensor a acondicionar: rangos de funcionamiento, parámetros de acondicionado, etc. Así se necesita crear un *datasheet* electrónico con toda esta información, que el sensor ha de transmitir al PC central que monitoriza los datos de la red.

Por todo esto se plantea el proyecto como el diseño de un interfaz de acondicionamiento compatible con muchos tipos de sensores, de bajo consumo y que se pueda conectar *plug&play* con un nodo de una red inalámbrica de sensores.

1.2 ESTADO DEL ARTE

Durante estos últimos años se ha estado investigando la forma de crear sensores *plug&play*. Con el acuerdo entre fabricantes de sensores, de instrumentación y de software se elaboró el estándar 1451.4 [1] en el que se definían los TEDS (*Transducer Electronic Datasheets*). Los TEDS se componen de un sensor y una pequeña unidad de

memoria donde se guardan sus especificaciones básicas. En el estándar se definen todos los campos de información que debe tener la memoria, pudiendo ser:

- TEDS básico: contiene identificador del fabricante, modelo, número de serie, etc.
- TEDS extendido: contiene fechas de calibración, rangos de medida, principales parámetros del sensor para realizar la lectura, etc.

Como se puede observar en la figura 1, el estándar también define un modelo mixto de comunicaciones, en el que existe una línea analógica para transmitir los valores de salida del sensor y una línea digital serie para transmitir su *datasheet* electrónico.

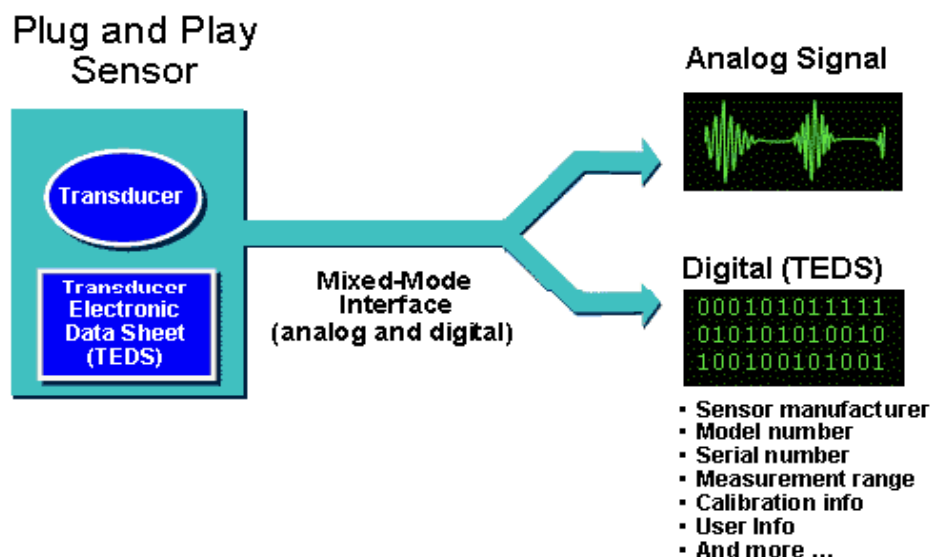


Figura 1: Esquema propuesto por el estándar 1451.4

El estándar no está creado para aplicaciones de bajo consumo, la cantidad de información que se guarda en el *datasheet* electrónico es demasiada y supondría un consumo excesivo tener que transmitir toda la información. Por ello en el diseño del interfaz propuesto sí que se sigue la idea del *datasheet* electrónico pero solo se guardarán aquellos parámetros que se consideran imprescindibles para cada tipo de sensor.

1.3 CONTEXTO

El proyecto fin de carrera está enmarcado dentro de un proyecto del Grupo de Diseño Electrónico (GDE) del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A) para el diseño de una red inalámbrica de sensores para la prevención, detección temprana y seguimiento de incendios forestales (GA-LC-039/2008), financiado por la Caixa y el Gobierno de Aragón.

El objetivo de este proyecto de investigación es desarrollar una red inalámbrica de sensores cuyos nodos posean sensores de temperatura, humedad, presión atmosférica, humo, etc. De esta forma, los nodos transmiten la información recogida cada cierto tiempo a un nodo coordinador conectado a un PC, donde las medidas de las variables ambientales son interpretadas y se hace un seguimiento para la detección y prevención de incendios.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto fin de carrera consiste en el diseño de un interfaz hardware para el acondicionamiento de diferentes tipos de sensores, compatible con las necesidades y restricciones de los nodos de una red sensorial inalámbrica.

El interfaz dispone de un pequeño microcontrolador MC9RS08KA8 de Freescale de bajo coste y bajo consumo que posee una pequeña memoria donde se almacenen las características y propiedades relevantes del sensor, necesarias para su acondicionamiento, medida, calibración y en su caso compensación, formando un reducido *datasheet* electrónico. Estas propiedades dependen del tipo de sensor, entre ellas destacan: tipo de sensor, curva de calibración y rangos de funcionamiento. Toda la electrónica y la memoria serán controladas por dicho microcontrolador. Éste se encarga de activar y programar la electrónica de acondicionamiento necesaria en función del tipo de sensor elegido. La señal analógica del sensor será convertida en una señal binaria, compatible con los niveles lógicos del sistema electrónico y de frecuencia variable, mediante un sistema VFC programable digitalmente por el microcontrolador,

proporcionándole así una mayor inmunidad al ruido y permitiendo mayor distancia entre el sensor y el nodo.

Las comunicaciones del interfaz con el nodo sensor siguen el protocolo I2C (*Inter Integrated Circuit*), con una frecuencia de reloj de 50 KHz.

Además se pretende diseñar un interfaz que siga con la filosofía *plug&play*, en el que la intervención del usuario en el sistema sea mínima. Al conectar el interfaz con el nodo de la red inalámbrica, el interfaz enviará a éste la información necesaria para caracterizar al sensor. Posteriormente el interfaz entrará en modo de bajo consumo, donde tanto el micro como el resto de la electrónica se encuentran desactivados. El interfaz tiene que ser capaz de interpretar un conjunto de comandos enviados desde el nodo, que lo activen y proporcionen al nodo la señal acondicionada y digitalizada cada vez que se le solicite. Una vez recibida dicha señal y gracias a la información enviada inicialmente, el nodo será capaz de conocer la medida obtenida de la magnitud física.

1.5 OBJETIVOS

Los objetivos de diseño del interfaz son:

- Hacer un diseño compatible con sensores resistivos y con sensores de salida en voltaje y con salida en intensidad.
- Integrar el sistema dentro de un nodo de la red inalámbrica de sensores probando el correcto funcionamiento del interfaz y del sistema final.
- Minimizar el consumo ya que es necesario integrarlo en un nodo donde la alimentación es por batería y ha de tener una vida operativa de al menos 12 meses. El interfaz sólo se activará cuando sea requerido por el nodo para tomar las medidas de los sensores, para lo que el microcontrolador hará uso de los modos de bajo consumo y la programación por interrupciones.
- Abaratar el precio final del interfaz utilizando componentes de bajo coste. Ello permitirá construir a partir de sensores analógicos y mediante la plataforma de acondicionamiento genérica propuesta *smart sensors*[2] de bajo coste.

1.6 DOCUMENTACIÓN APORTADA

En este apartado se expone la documentación aportada en el proyecto fin de carrera. Está compuesta por dos bloques, la **memoria** y los **anexos**. La **memoria** es el documento principal en el que se describen desde los objetivos iniciales del proyecto hasta los resultados y las conclusiones, pasando por una explicación razonada de las tecnologías, componentes y herramientas utilizadas en el diseño del interfaz. La memoria está dividida en 8 partes:

- Descripción del proyecto.
- Diseño del interfaz.
- Red inalámbrica de sensores.
- Resultados.
- Conclusiones.
- Planificación temporal.
- Referencias bibliográficas.
- Acrónimos y abreviaturas.

Los **anexos** sirven para complementar la información detallada en la memoria. El proyecto fin de carrera tiene 6 anexos:

- Anexo A: Cálculos de la ganancia y el offset.
- Anexo B: Distribución de las señales de control del interfaz.
- Anexo C: Protocolo I2C.
- Anexo D: Sensores aplicados.
- Anexo E: Tipos de variables.
- Anexo F: Formato de la trama WSN.

2 DISEÑO DEL INTERFAZ

Durante este apartado se presenta un análisis detallado del diseño del interfaz. Éste está compuesto por el diseño del sistema electrónico y la programación del microcontrolador. El apartado termina con un análisis de los sensores aplicados al interfaz cuyo funcionamiento ha sido testeado.

2.1 DISEÑO HARDWARE

El diseño *hardware* consiste en la elección de todos los componentes electrónicos, tanto pasivos como activos, que formarán parte del interfaz. Durante este diseño se siguen una serie de pautas para cumplir con los objetivos marcados. Estas las podríamos resumir en:

- Elegir componentes que hagan que el interfaz sea lo más genérico posible, es decir, compatible con el mayor número de sensores
- Elegir componentes de bajo consumo.
- Elegir componentes de bajo coste.

En la mayoría de los casos no podemos optimizar los tres parámetros a la vez, por lo que se produce un compromiso que no es fácil de resolver.

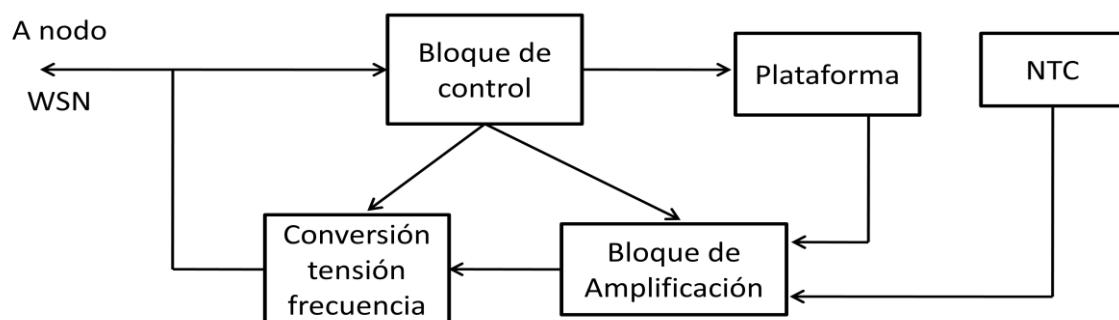


Figura 2: Diagrama de bloques del interfaz.

En la figura 2 se observa el diagrama de bloques del *hardware* del interfaz. Durante los siguientes apartados se explica detalladamente la estructura de cada uno de los bloques.

2.1.1 SENSOR DE TEMPERATURA : NTC

Muchos sensores comerciales tienen fuertes dependencias con la temperatura, lo que hace necesario conocer cuál es la temperatura a la que se encuentra el sensor para poder tomar lecturas correctas de la magnitud física. Como el interfaz diseñado tiene que ser independiente y autónomo, se convierte en necesario integrar en el interfaz un sensor de temperatura. Este sensor permitirá establecer la temperatura a la que se realizan las medidas del resto de sensores para su posterior compensación térmica. Como sensor de temperatura se ha elegido una NTC (*Negative Temperature Coefficient*) por tener una curva de calibración conocida, un sencillo acondicionamiento y un bajo coste.

Las NTC son termistores que presentan una dependencia negativa de la resistencia frente a la temperatura. Esto supone que experimentan disminuciones de resistencia con aumentos de la temperatura. La dependencia de la resistencia con la temperatura tiene un carácter exponencial que viene dado por la ecuación 1.

$$R_2 = R_1 \cdot e^{\left(\frac{B}{T_2} - \frac{B}{T_1}\right)} \quad (1)$$

Donde B [°K] es una constante se denomina temperatura característica, y T es la temperatura [°K], R_i son los valores de resistencias [Ω] para la temperatura dada T_i . La NTC que se ha empleado, tiene como valor teórico, $B=4300^\circ K$, y una resistencia a temperatura ambiente ($T=25^\circ C$), $R_0=4,6k\Omega$. Este termistor tiene, por tanto, un rango de aplicación que cubre perfectamente los valores de temperatura típicos [$-20^\circ C$, $80^\circ C$] de monitorización medioambiental.

El circuito de acondicionamiento básico de cualquier NTC es un divisor resistivo. En un circuito electrónico no es posible tomar lecturas del valor de resistencia, con un divisor resistivo convertimos las variaciones de resistencia en variaciones de voltaje para su posterior tratamiento.

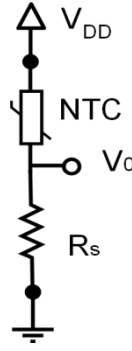


Figura 3: Divisor resistivo, circuito de acondicionamiento de la NTC.

Así la tensión de salida en función de la temperatura tiene la ecuación 2.

$$V_0 = \frac{V_{DD}}{R_s + R(T)} \cdot R(T) \quad (2)$$

El objetivo es que en el rango de temperaturas en las que se va a obtener la respuesta, la dependencia sea lineal. Para ello tenemos que calcular el valor de la resistencia del divisor R_s de forma que el punto de inflexión se encuentre en la mitad del rango de temperaturas de medida (T_c). Así R_s se puede calcular con la ecuación 3.

$$R_s = R(T_c) \cdot \frac{B - 2 \cdot T_c}{B + 2 \cdot T_c} \quad (3)$$

Para los rangos típicos de temperatura de medida en una aplicación ambiental $[-20^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}]$, $T_c=30^\circ\text{C}$, por lo que el valor de R_s es aproximadamente $2,7 \text{ k}\Omega$.

2.1.2 PLATAFORMA PARA LOS SENSORES

La plataforma es el conjunto de entradas o pines que tiene el interfaz para poder conectar los sensores y a la electrónica básica de acondicionamiento[3]. El objetivo propuesto es que sea compatible para sensores resistivos, con salida en voltaje y con salida en intensidad. Además también debe ser compatible para sensores de intensidad o voltaje con salida diferencial, en los que la información está en la diferencia de esa magnitud eléctrica entre dos pines del sensor.

El acondicionamiento básico de los sensores consistirá en convertir las variaciones de voltaje, intensidad o resistencia en variaciones de voltaje que posteriormente amplificaremos, convertiremos a frecuencia y enviaremos al exterior del interfaz: los sensores resistivos utilizan como acondicionamiento, como ya hemos visto, un divisor resistivo en el cual el valor de la resistencia del divisor dependerá de las características del propio sensor; los sensores con salida en intensidad se acondicionan con una resistencia en serie que convierte la intensidad en voltaje. Además normalmente los sensores con salida en intensidad necesitan ser alimentados. Por otro lado, los sensores con salida en voltaje no necesitan de una etapa de acondicionamiento específica, aunque habitualmente necesitan ser alimentados.

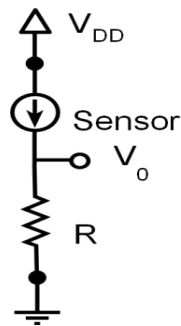


Figura 4: Circuito de acondicionamiento básico de un sensor de intensidad

Los sensores diferenciales con salida en intensidad necesitan un esquema como el propuesto para los de salida no diferencial, pero con dos ramas. La diferencia de voltaje entre estas se realiza en la etapa de amplificación con amplificadores diferenciales o amplificadores de instrumentación de igual manera que para los sensores diferenciales con salida en voltaje.

En ocasiones se necesitan configuraciones especiales para acondicionar determinados sensores. Este es el caso de los puentes de weasthone que se utilizan para linealizar la respuesta de algunos sensores resistivos como por ejemplo galgas extensiométricas. La salida de los puentes de wheatstone es diferencial y la diferencia es calculada en las etapas de amplificación.

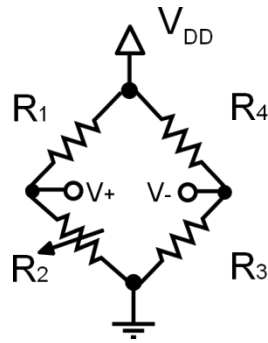


Figura 5: Puente de Wheatstone.

Con las consideraciones expuestas, la figura 6 muestra el diseño de la plataforma compatible tanto con sensores diferenciales como con no diferenciales, tanto resistivos como con salida en intensidad y en tensión, y con acondicionamiento mediante puente de Wheatstone.

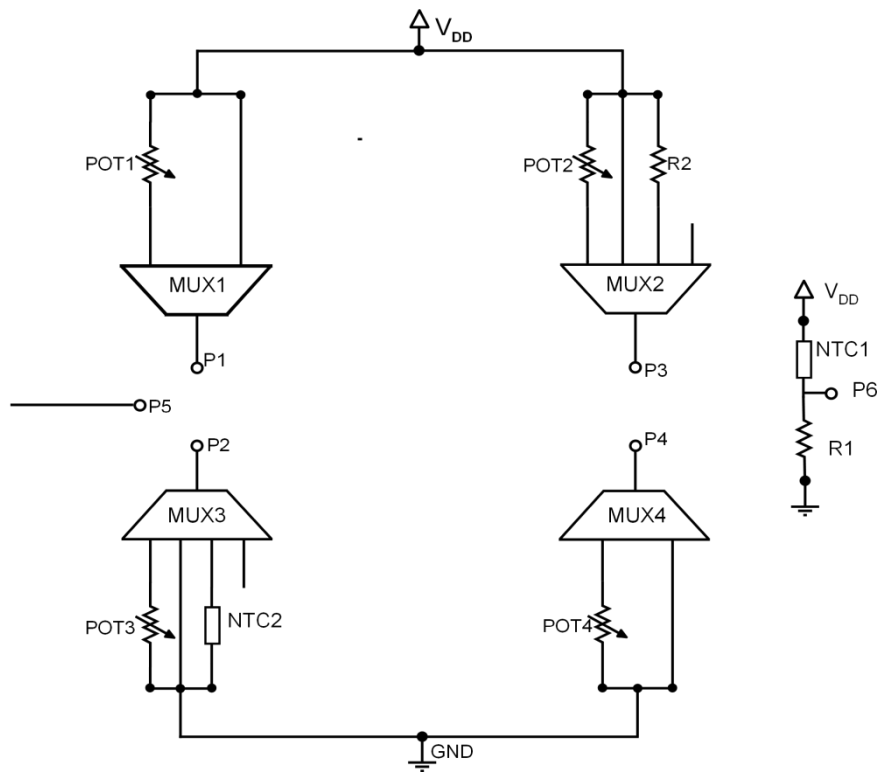


Figura 6: Esquemático de la plataforma

En la figura 6 se observan los 5 pines (P1-P5) en los que se conectan los sensores. El sensor que se va a acondicionar se conecta adecuadamente a los terminales P1-P4. El pin P5, controlado por el bloque de control del interfaz, que veremos posteriormente, es una entrada digital que puede ser conectada a la entrada de control de que disponen algunos sensores analógicos comerciales para habilitar modos de bajo consumo. El

sexto pin (P6) es la salida del circuito de acondicionamiento de la NTC integrada en el interfaz (NTC1) que se emplea para compensación térmica.

Los multiplexores digitales (MUX1-MUX4) escogidos son los ADG719 (multiplexor 2:1) y ADG704 (multiplexor 4:1) de Analog Devices. Estos dispositivos tienen la misión de seleccionar una de sus entradas como salida, atendiendo al tipo de operaciones requeridas por el sensor conectado. La salida es seleccionada por el bloque de control del interfaz a través de los correspondientes terminales de control. De esta forma se puede configurar el esquema de acondicionamiento deseado.

Las resistencias de los puentes resistivos han sido implementadas mediante potenciómetros lineales programables digitalmente. Los potenciómetros elegidos son MAX5400 de Maxim, de 50 $k\Omega$ de valor nominal y 256 pasos, con un error en cero de aproximadamente 300 Ω . Estos potenciómetros son programados por el bloque de control para obtener los valores de resistencia necesarios en el acondicionamiento de cada sensor.

Puede resultar sorprendente que en la plataforma haya una NTC entre el multiplexor 3 y GND (NTC2). Esto es debido a que forma parte del acondicionamiento del sensor de humedad que tiene características especiales y que se explicarán en el apartado 2.3.2.

2.1.3 BLOQUE DE AMPLIFICACIÓN

Las señales de voltaje de salida de la plataforma pueden tener rangos de variación muy dispares dependiendo del sensor conectado. Si las variaciones son pequeñas, la resolución de nuestro sistema va a ser pequeña produciendo errores en las medidas considerables. Para mejorar la resolución se deben ajustar las variaciones de voltaje al máximo rango posible, entre la tensión de alimentación ($V_{DD}=3.3$ V) y tierra (GND=0 V). Conociendo la relación entrada-salida del sensor, si conocemos el rango de variación física del sensor podemos conocer el rango de voltaje a la salida de la plataforma. De esta forma, si restamos primero el voltaje mínimo de salida del sensor (offset) a la salida de la plataforma y a continuación amplificamos por el valor

apropiado, podemos ajustar las variaciones de la tensión de salida del sensor acondicionado entre V_{DD} y GND.

Sabemos que algunos de los sensores tienen una salida diferencial, por lo que es necesario realizar una amplificación diferencial. Para ello típicamente se utilizan los amplificadores de instrumentación. La figura 7 representa el diagrama básico de un amplificador de instrumentación.

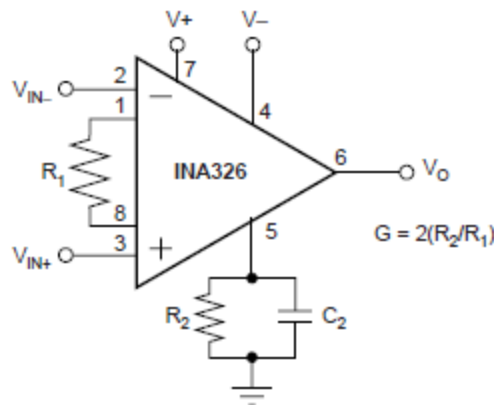


Figura 7: Amplificador de Instrumentación.

El voltaje de salida (ecuación 4) de un amplificador de instrumentación es proporcional a la diferencia de las tensiones en sus entradas y a la relación entre las resistencias R_2 y R_1 (figura 7).

$$V_0 = 2 \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \cdot (V_{IN+} - V_{IN-}) \quad (4)$$

Con un solo amplificador de instrumentación no es factible restar offset y hacer una amplificación diferencial. Podríamos pensar en utilizar una etapa restadora con un solo amplificador operacional, pero algunos sensores, como las LDR, pueden tener valores de impedancia de salida muy altos provocando desadaptaciones de impedancias. La mejor solución es utilizar dos amplificadores de instrumentación en serie, con el primero se resta el offset y con el segundo se realiza la amplificación. En la figura 8 se muestra el esquema completo del bloque amplificador.

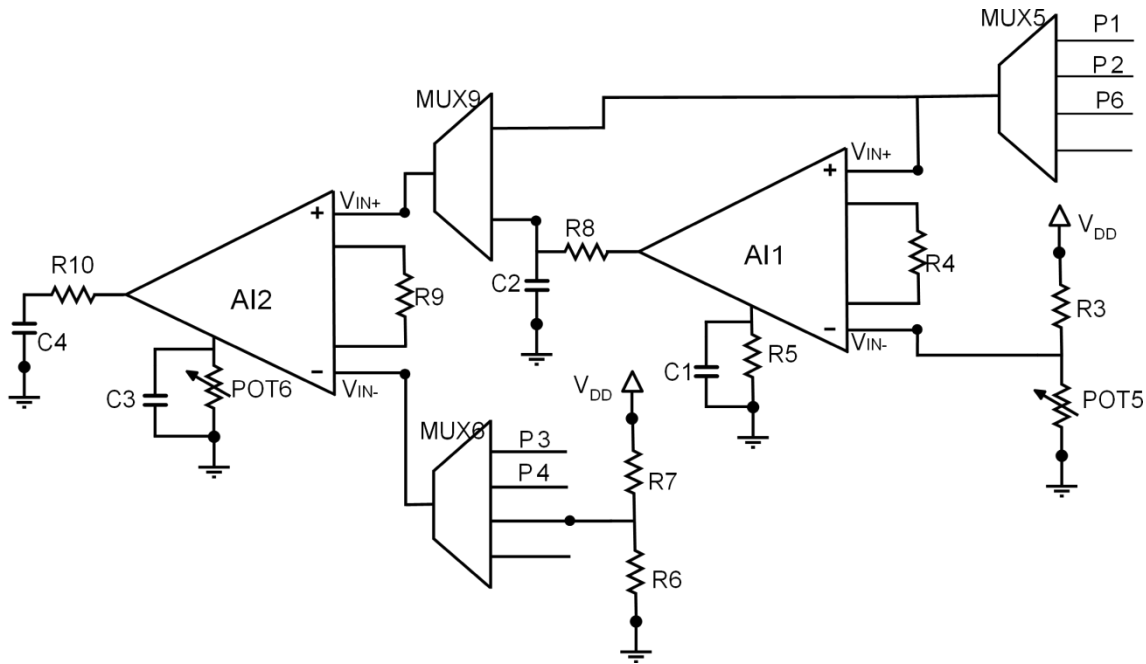


Figura 8: Bloque de amplificación

En el primer amplificador de instrumentación (AI1) se produce la resta del offset. Su entrada V_{IN-} está conectada a un divisor resistivo con un potenciómetro programable (POT5). De esta forma, el bloque de control programa el valor de offset en función del sensor conectado. La entrada V_{IN+} del amplificador está conectada a un multiplexor 4:1 (MUX5) de forma que es posible la conexión con los terminales P1 y P2 de la plataforma y con la salida de la NTC (P6), para poder realizar medidas de la temperatura. Los valores de las resistencias R4 y R5 han sido escogidos para tener a la salida de AI1 ganancia unidad.

El segundo amplificador de instrumentación (AI2) conforma la etapa de ganancia del sistema. Ésta viene determinada por la relación entre las resistencias R9 y POT6 de la etapa. Variando el valor de resistencia del potenciómetro programable (POT6) es posible modificar la ganancia desde el bloque de control. El multiplexor 4:1 (MUX6) permite seleccionar la señal de entrada a V_{IN-} de entre las salidas P3 y P4 de la plataforma y un divisor resistivo, compuesto por R7 y R6, que proporciona un valor muy pequeño de tensión (aproximadamente 50 mV). Para los sensores que no son diferenciales la entrada V_{IN-} en este segundo amplificador debería estar conectada a 0V, el nivel inferior del rango de tensión de alimentación. Sin embargo, debido a que los amplificadores de instrumentación empleados en este trabajo no son verdaderos amplificadores *rail-to-rail* en entrada (es decir, necesitan un voltaje mínimo en sus dos

entradas para trabajar correctamente), es preciso añadir un pequeño valor de tensión, que en este caso es aproximadamente 50 mV. Esto supone una limitación en el diseño, ya que para sensores no diferenciales el interfaz no podrá detectar valores inferiores a 50 mV que provengan de la plataforma. Sin embargo, debido al reducido valor de esta tensión mínima en estos amplificadores, su efecto se aprecia en muy pocos tipos de sensores y en un rango muy reducido de valores.

En determinadas ocasiones puede interesar no restar offset a la señal del sensor. El multiplexor 2:1 (MUX9) posibilita conectar las salidas de la plataforma directamente con el segundo amplificador de instrumentación (AI2), evitando la etapa de resta de offset producida en el amplificador AI1.

Los cálculos de la ganancia y el offset de los diferentes sensores se explica detalladamente en el anexo A.

Para el diseño de esta etapa amplificadora se han empleado potenciómetros digitales MAX5401 de Maxim, de 100 k Ω de valor nominal, 256 pasos y un error de cero aproximado de 300 Ω . Los multiplexores son ADG719 y ADG704, los mismos empleados en la plataforma de conexionado de sensores (figura 6). Los amplificadores de instrumentación de este bloque son INA327 de Texas Instruments de bajo coste y bajo consumo.

2.1.4 CONVERSIÓN TENSIÓN FRECUENCIA

A la salida del bloque de amplificación de la figura 8 tendremos una señal de tensión cuyo rango de valores se encuentra entre V_{DD} y 0V. Esta señal analógica puede ser transmitida desde el interfaz de acondicionado al resto del nodo sensor mediante dos hilos, si bien presenta una serie de inconvenientes:

- Los cables que unen el interfaz con el nodo de la red inalámbrica de sensores tienen pérdidas que, aunque son muy pequeñas, si la distancia del interfaz al nodo es considerable pueden ser no despreciables. Estas pérdidas supondrán

tomar valores de voltaje menores y por lo tanto un error en la lectura de las medidas, en principio no conocido.

- Por otra parte en entornos naturales existe ruido electromagnético que puede generar interferencias que afecten considerablemente al valor de las señales analógicas.

Si empleamos para transmitir información una señal binaria con codificación de datos en su frecuencia[4], los efectos de las interferencias y pérdidas en la línea de transmisión se reducen drásticamente. Por ello se ha decidido incluir un conversor tensión-frecuencia (VFC) en el interfaz. El VFC comercial elegido es el AD7740 de Analog Devices, capaz de trabajar a 3.3 V y de coste bajo. El VFC genera una señal digital cuya frecuencia está comprendida entre 0.9 y 0.1 veces la frecuencia de la señal de referencia. La señal de referencia es generada por el bloque de control con una frecuencia de 500 kHz , por lo que la salida del VFC tendrá una frecuencia proporcional a la entrada dentro del rango de 450 kHz a 50 kHz . Esta señal de frecuencia variable es enviada al nodo de la red inalámbrica de sensores y será el nodo el que se encargue de efectuar la conversión frecuencia-palabra digital para poder realizar la lectura.

2.1.5 BLOQUE DE CONTROL

El bloque de control se encarga de programar, activar y configurar toda la electrónica del interfaz. Está formado por un microcontrolador y tres registros de desplazamiento de 8 bits encadenados creando un registro de desplazamiento de 24 bits.

El microcontrolador seleccionado es el MC9RS08KA8 de Freescale. Es un micro de 20 pines de bajo coste, especialmente diseñado para aplicaciones de bajo consumo. Se encarga tanto de las comunicaciones del interfaz con el exterior (protocolo I2C), como de gestionar toda la electrónica del interfaz: programar los potenciómetros digitales, configurar los multiplexores y activar/desactivar los amplificadores de instrumentación, generar la señal de referencia del VFC, etc. Sin embargo el micro no tiene tantos pines como señales necesarias, así que es imprescindible realizar una conversión serie/paralelo. Esta conversión se realiza mediante los tres registros de desplazamiento

de 8 bits SN74HC594D de Texas Instruments que, encadenados, forman un registro de 24 bits. El micro escribe en serie los valores de los 24 bits del registro. Una vez configurado por el micro, el registro contiene las señales de control adecuadas para los multiplexores y amplificadores de instrumentación permitiendo al microcontrolador emplear el resto de recursos de entrada/salida para programar los potenciómetros digitales, crear la señal de referencia del VFC y de las comunicaciones del interfaz con el exterior. En el anexo B se expone la distribución de pines del microcontrolador y de los tres registros y así como la función de cada uno de ellos.

En el apartado 2.2 de la memoria se detallan con detenimiento las funciones del micro, su programación y la comunicación del interfaz con el exterior.

2.1.6 ALIMENTACIÓN

El diseño del interfaz está planteado para poder ser conectado con un nodo de una red inalámbrica de sensores. Dichos nodos trabajan con baterías de 3.3 voltios, pudiendo trabajar a 1.8 voltios gracias a un regulador de tensión integrado. El interfaz debe ser alimentado por el nodo, de esta forma se ha considerado que la alimentación sea de 3.3 voltios.

En una aplicación portátil es importante reducir el consumo al máximo, por lo que el interfaz sólo debe estar activo para realizar las medidas cuando el nodo lo solicite, permaneciendo desactivado el resto del tiempo. Para ello se utilizan los modos de bajo consumo del microcontrolador y terminales de habilitación (permiten desactivar los dispositivos) en el resto de componentes del circuito. Debido a que alguno de los elementos elegidos, como el VFC o los multiplexores 2:1, no disponen de terminal de habilitación, es necesario disponer de una segunda línea de alimentación para estos dispositivos que se active solamente cuando se produzca una lectura del sensor. De esta forma el VFC y los multiplexores no estarán activos de forma continua, reduciendo su consumo promedio. En la figura 9 se representa el esquemático para crear la segunda alimentación (V_{DD2}), donde el multiplexor es configurado por el bloque de control de forma que V_{DD2} valdrá 3.3 voltios sólo durante la lectura del sensor, valiendo 0 voltios el resto de tiempo.

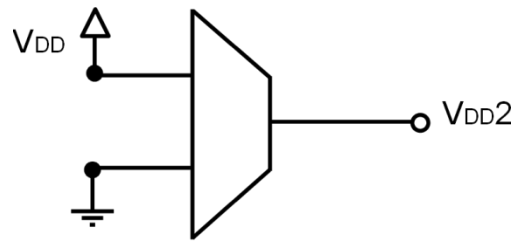


Figura 9: Líneas de alimentación.

Un elemento importante al hablar de la alimentación en el interfaz son los desacoplos. En los circuitos digitales hay que tratar de eliminar todo el ruido de alta frecuencia procedente tanto de los circuitos integrados como de las líneas de alimentación. Para ello se colocan condensadores de desacoplo entre 3.3V y 0V junto a los pines de alimentación de cada uno de los integrados del interfaz (multiplexores, potenciómetros, registros, microcontrolador y VFC). Para realizar el desacoplo se han utilizado condensadores con los valores recomendados por los fabricantes de los integrados, que típicamente son de 10 μ F, 1 μ F, y 100 nF.

2.2 MICROCONTROLADOR Y SOFTWARE

Una vez diseñado el hardware del interfaz, es necesario programar el microcontrolador para que gestione toda la electrónica del interfaz y para poderse comunicar con el nodo de la red inalámbrica de sensores.

Como ya he comentado el microcontrolador elegido es el MC9RS08KA8 de Freescale, sus características básicas son:

- Microcontrolador de 8 bits, capaz de trabajar a frecuencias de hasta 10 Mhz.
- 8 Kbytes de memoria flash y 254 bytes de memoria RAM.
- Modos *wait* y *stop* de bajo consumo.
- Periféricos: *timers*, conversor AD, comparador analógico, módulo I2C, etc.
- Bajo coste y bajo consumo.

La programación de micro se ha realizado con el entorno Code Warrior 6.3 y la placa de desarrollo DEMO9RS08KA8.

En este apartado se detallan el desarrollo del protocolo de comunicaciones del microcontrolador con el nodo sensor, la estructura de la unidad de memoria donde se almacena el *datasheet* electrónico y el listado de comandos implementados en el micro, para posibilitar el funcionamiento del sistema total. Se termina con una breve descripción del software programado en el microcontrolador.

2.2.1 PROTOCOLO DE COMUNICACIONES

Una parte fundamental en el diseño de cualquier dispositivo electrónico es elegir el modo de comunicación con el resto de dispositivos. La elección en el diseño del interfaz presentado es el protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*) [5], que permite comunicaciones serie síncronas con una velocidad de hasta 100Kbits por segundo. El bus I2C utiliza 3 líneas: reloj (SCL), con la que se sincroniza el sistema, datos (SDA), por la que se transmiten los datos entre dispositivos y una referencia común(GND). En el bus I2C se pueden conectar varios dispositivos, que pueden actuar como maestros o esclavos (figura 10).

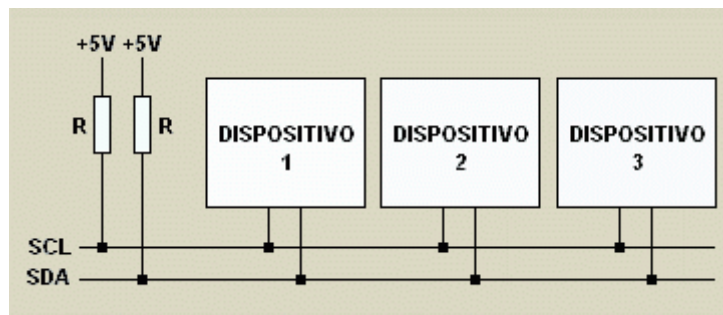


Figura 10: Estructura bus I2C

Los dispositivos maestros determinan los tiempos y la dirección del tráfico, mientras que los dispositivos esclavos reciben señales de comando y de reloj desde el maestro. Cada dispositivo conectado tiene una dirección I2C única, de forma que el maestro cada vez que manda comandos envía inicialmente la dirección I2C del dispositivo al que va destinado y sólo este dispositivo procesará el comando.

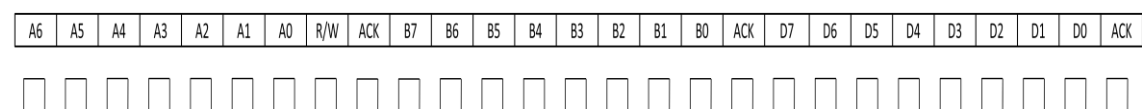


Figura 11: Estructura de la trama I2C

La estructura de la trama I2C se puede observar en la figura 11. El primer byte transmitido está compuesto de la dirección I2C (A6-A0) del dispositivo al que va dirigido el comando y de un bit R/W que indica si es un comando de escritura o de lectura. Después de este byte el esclavo contesta con un ACK, confirmando que ha recibido correctamente la dirección. El segundo byte es la dirección de memoria (B7-B0) del dispositivo esclavo donde el maestro desea realizar la escritura o la lectura, seguido de un ACK enviado por el esclavo. El tercer y último byte es el dato (D7-D0) que en el caso de que sea una escritura es proporcionado por el maestro y el esclavo contesta con un ACK, y en el caso de ser una lectura es proporcionado por el esclavo contestando el maestro con un ACK si la recepción es correcta. Así, el protocolo I2C permite que el dispositivo maestro lea o escriba de una dirección de memoria del dispositivo esclavo. En el anexo C se explica detalladamente el protocolo de comunicaciones I2C.

En el sistema final el interfaz y el nodo están conectados con un bus I2C, donde el nodo hace de maestro y el interfaz de esclavo. De esta forma el nodo puede leer y escribir en la memoria del interfaz. Esto es explicado en profundidad en el apartado 2.2.3.

El microcontrolador MC9RS08KA8 tiene un modulo I2C integrado, de forma que con sólo activarlo y escribir y leer de un determinado registro se pueden establecer comunicaciones I2C tanto con funcionalidad de maestro como de esclavo. Sin embargo, este módulo no envía la dirección de memoria del esclavo donde se desea leer o escribir. Además el consumo del módulo I2C activo es demasiado alto, por lo que se ha decidido implementar vía software siguiendo los tiempos, la estructura de trama de la figura 11 y ahorrando consumo. El protocolo I2C implementado utiliza 4 líneas, ya que existen dos líneas de datos; una para la transmisión de datos en el sentido maestro-esclavo(SDAO) y otra para el sentido esclavo-maestro(SDAI). Esta implementación es más sencilla y nos permite programar el plug&play con el nodo sensor, como se explica en el apartado 3.4. Así se consiguen comunicaciones de 50 Kbits por segundo entre el nodo y el interfaz.

2.2.2 ESTRUCTURA DE LAS MEMORIAS

El microcontrolador posee dos memorias: RAM (254 bytes) y Flash (8 Kbytes). La Flash es una memoria no volátil que se utiliza principalmente para guardar el código del programa que el microcontrolador ejecuta. Sus tiempos de accesos son bastante elevados. La RAM es una memoria volátil, con unos tiempos de acceso pequeños lo que posibilita que en ella se guarden las variables utilizadas durante la ejecución.

Una de las características fundamentales del interfaz es que dispone de las especificaciones del sensor conectado almacenadas en un *datasheet* electrónico. Como además tenemos un sensor de temperatura NTC integrado, debemos almacenar en el interfaz ambas hojas de especificaciones electrónicas. Este *datasheet* electrónico tiene que ser almacenado en la memoria del microcontrolador, de forma que pueda transmitir esta información mediante el protocolo I2C al nodo de la red. Además, esta información necesita ser leída en tiempo de ejecución, por lo que es aconsejable que se guarde en la memoria RAM para no ralentizar la ejecución.

El microcontrolador controla la electrónica de todo el interfaz (recordemos que se encarga de programar los potenciómetros digitales y configurar el registro de desplazamiento de 24 bits que controla los multiplexores del circuito). Por lo tanto, es necesario guardar en memoria RAM los valores de las palabras digitales que programan los potenciómetros y el valor de los 3 bytes para configurar el registro.

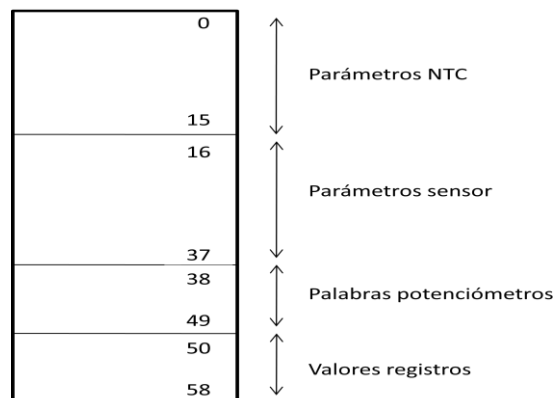


Figura 12: Estructura de la memoria del interfaz

Toda esta información se guarda en la memoria del interfaz cuya estructura se observa en la figura 12. Los 16 primeros bytes conforman el *datasheet* electrónico de la NTC y los 22 siguientes bytes el del sensor. En el apartado 2.3 se detalla el contenido de ambos *datasheets* electrónicos.

En las posiciones 38 a 49 de la memoria del interfaz se almacenan los valores de configuración de los potenciómetros digitales para el acondicionamiento de la NTC y del sensor. Los 6 primeros, del 38 al 43, contienen las palabras digitales de los potenciómetros para el acondicionamiento de la NTC. Los otros 6, del 44 al 49, guardan las palabras digitales para el acondicionamiento del sensor.

Por último en los 9 bytes del 50 al 58, se guardan los valores de los 3 bytes del registro de desplazamiento para realizar una lectura de la NTC, del sensor y para poder entrar en modo de bajo consumo donde todos los dispositivos están desactivados.

2.2.3 COMANDOS

El protocolo I2C implementado en el dispositivo que hace de maestro (el nodo sensor), tiene capacidad para realizar lecturas y escrituras en una determinada dirección de memoria del dispositivo esclavo (el interfaz). En nuestro sistema pretendemos que no sólo haya lecturas y escrituras de la memoria del interfaz, sino que éste entienda una serie de comandos como “configura el interfaz para realizar el acondicionamiento” o “dame la lectura del sensor”. Para ello existen dos posiciones en la memoria del interfaz en las que si el nodo escribe unos determinados valores, el interfaz lo interpreta y ejecuta una serie de órdenes. Estas posiciones son la 15 en la que el nodo escribe comandos para la configuración y lectura de la NTC y la 37 para los comandos referidos al sensor. En los apartados siguientes se describen todos los comandos implementados en el sistema.

Comando *Parámetros NTC*

Como ya se ha comentado, el interfaz tiene en la memoria del microcontrolador los parámetros necesarios para que, una vez el nodo obtenga del interfaz el valor de la lectura del sensor, pueda conocer el valor de la magnitud física. Para ello, el nodo

sensor debe disponer de la información necesaria para su traducción, almacenada en el *datasheet* incluido en el interfaz. El comando ***parámetros ntc*** transfiere desde el interfaz al nodo sensor los parámetros correspondientes a la NTC integrada. Este comando permite al nodo leer las posiciones 0 - 14 de la memoria del interfaz, donde se encuentra la información requerida.

Comando *Parámetros sensor*

Al igual que con la NTC, para que el nodo pueda interpretar las lecturas del sensor conectado al interfaz de acondicionado es necesario que éste transmita el correspondiente *datasheet* electrónico. El comando ***parámetros sensor*** permite al nodo obtener esta información, realizando lecturas de las posiciones 16-36 de la memoria del interfaz.

Comando *Configuración interfaz NTC*

La electrónica programable del interfaz está compuesta por registros, potenciómetros, multiplexores y el VFC. Los multiplexores y el VFC deben activarse cuando el nodo pida la lectura del sensor o de la NTC. Sin embargo antes es necesario haber programado los potenciómetros digitales para que las medidas sean correctas. El comando ***Configuración interfaz NTC*** programa los 6 potenciómetros digitales para el correcto acondicionamiento de la NTC. El nodo envía este comando escribiendo en la dirección de memoria 15 la palabra 0xFF.

El microcontrolador es quien realiza la programación de los potenciómetros, para ello utiliza la información guardada en las posiciones 38-43 de la memoria del interfaz. El empleo de programación en serie permite utilizar la línea SCL proporcionada por el nodo como reloj para programar los potenciómetros, ahorrando así un pin en el microcontrolador.

Comando *Configuración interfaz sensor*

De la misma forma que con ***Configuración interfaz NTC***, el comando ***Configuración interfaz sensor*** programa los 6 potenciómetros digitales para un correcto acondicionado del sensor conectado al interfaz. En este caso el nodo debe escribir en la dirección de memoria 37 la palabra digital 0xFF. Igual que en el caso de ***Configuración interfaz***

NTC, la programación de los potenciómetros se realiza en serie, empleando las posiciones de memoria 44-49 para su programación.

Comando *Lectura NTC*

El nodo tiene que ser capaz de solicitar al interfaz una lectura de medida de la NTC. Para ello utiliza el comando *Lectura NTC*, que se implementa escribiendo en la posición 15 de la memoria del interfaz la palabra digital 0xAA. Una vez que el micro del interfaz reconoce el comando, configura el registro de desplazamiento con el contenido de la memoria en las posiciones 53-55. El registro de desplazamiento es el que se encarga de activar los multiplexores y amplificadores permitiendo tener un valor de voltaje correcto a la salida del bloque de amplificación. Después el microcontrolador envía la señal de referencia de 500 kHz al VFC, que genera la señal digital con la información en la frecuencia. Esta señal es enviada al nodo, por la línea SDAI, para la conversión frecuencia-palabra digital. Cuando la conversión ha terminado, el nodo contesta con un ACK al interfaz, el micro del interfaz lo reconoce y deja de generar la señal de referencia del VCO. Para terminar el micro vuelve a configurar el registro utilizando la información guardada en las posiciones de memoria 50-52, así se vuelve a desactivar los multiplexores y los amplificadores quedando el interfaz en modo bajo consumo. En la figura 13 se observa el diagrama de estados del microcontrolador durante la ejecución del comando *lectura NTC*.

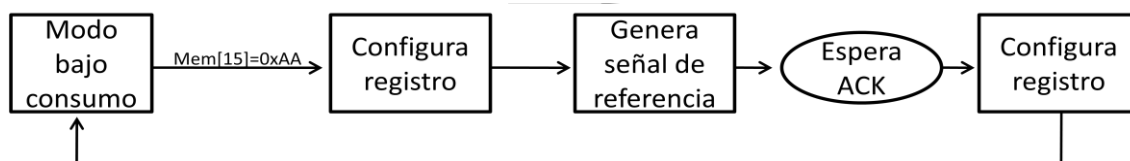


Figura 13: Diagrama de estados del comando *lectura NTC*.

Comando *Lectura sensor*

Igual que *Lectura ntc*, el comando *Lectura sensor* proporciona al nodo la señal digital con la información sobre el valor de la medida codificado en su la frecuencia. Este comando es ejecutado por el interfaz cuando el nodo escribe en la posición 37 de la memoria del interfaz la palabra digital 0xAA. El microcontrolador, como en el caso de *Lectura ntc*, configura el registro (pero ahora con el contenido de las posiciones 56-58),

activa el VFC y cuando el nodo termina la conversión contesta con ACK, desactiva el VFC y configura el registro para establecer el modo bajo consumo del interfaz. En la figura 14 se observa el diagrama de estados del microcontrolador durante la ejecución del comando *lectura sensor*.

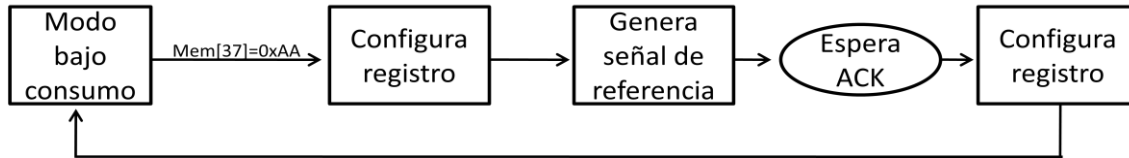


Figura 14: Diagrama de estados del comando *lectura sensor*.

2.2.4 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

El objetivo de este apartado es proporcionar una breve descripción del diagrama de flujo del software programado en el microcontrolador. Se pretende dar una visión global de la estructura del programa descrita en los apartados anteriores.

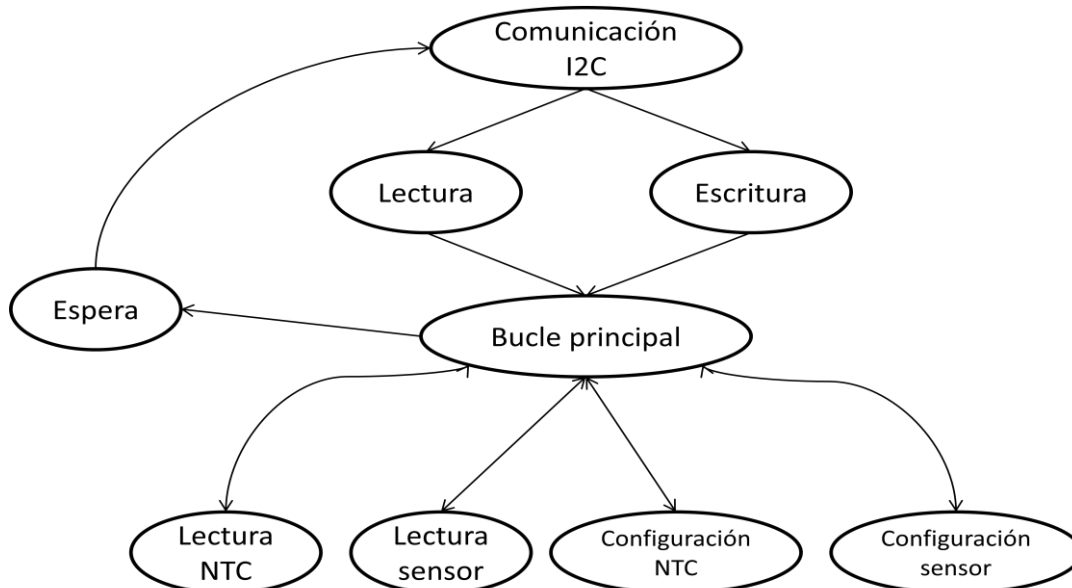


Figura 15: Estructura del programa

La figura 15 muestra la estructura del programa que se describe a continuación. Una vez se alimenta el interfaz, el microcontrolador del interfaz se activa entrando en el *bucle*

principal. En la primera iteración, el micro pasa directamente al estado de *espera*. El estado de *espera* es un modo de operación de bajo consumo donde el micro se “duerme” y toda la electrónica del interfaz está desactivada. Al recibir una condición de inicio del protocolo I2C el micro sale de ese estado y pasa al de *comunicación I2C*. En este estado el micro recibe una dirección de memoria y la operación que debe realizar, lectura o escritura, volviendo posteriormente al bucle principal. Si en las direcciones de memoria 15 o 37 se han escrito las palabras digitales 0xAA o 0xFF, desde el bucle principal se ejecutará el correspondiente comando: *Lectura NTC*, *Lectura sensor*, *Configuración NTC*, *Configuración sensor*. En caso contrario el micro vuelve al estado de espera hasta que se produzca una nueva comunicación I2C.

2.3 SENSORES APLICADOS

El objetivo fundamental del proyecto fin de carrera es diseñar un interfaz que sea compatible con el mayor número posible de sensores. Los sensores reaccionan ante cambios en magnitudes físicas (temperatura, presión, humedad...), produciendo cambios en características que pueden ser detectadas en un circuito eléctrico (voltaje, intensidad, resistencia, inductancia y capacidad). Desde este punto de vista podemos clasificar los sensores en resistivos, capacitivos, inductivos, con salida en tensión o con salida en corriente. Los sensores capacitivos e inductivos necesitan condensadores y bobinas para ser acondicionados, pero con las tecnologías actuales no existen condensadores ni bobinas programables digitalmente, con valores apropiados para nuestra aplicación. Además los sensores inductivos suelen ser voluminosos, pesados y de consumo elevado, por lo que apenas se emplean en aplicaciones portátiles. Ello nos ha llevado a desarrollar un interfaz compatible con los tipos de sensores más comunes en este tipo de aplicaciones, descartando estos dos tipos de sensores. Así el objetivo es que el interfaz sea compatible con sensores resistivos, con salida en voltaje y con salida en corriente, independientemente de la extensión de las variaciones en la salida.

Los sensores resistivos escogidos son una LDR (*Light Dependent Resistor*), un sensor de humedad y la NTC. La NTC sufre cambios relativamente pequeños en el valor de su resistencia, mientras que la LDR y el sensor de humedad sufren cambios grandes. Como sensores de salida en voltaje se han seleccionado un sensor Hall y un termopar. El

sensor Hall produce salidas en tensión relativamente altas, mientras que el termopar es un sensor diferencial con variaciones de tensión muy pequeñas. En cuanto a sensores de salida en intensidad se ha elegido un fotodiodo cuyas variaciones en la salida son muy pequeñas. No es sencillo encontrar sensores de intensidad que proporcionen valores altos de corriente, y carece de sentido en aplicaciones de baja potencia. En el anexo D se detallan las características principales de estos sensores, así como las variables guardadas en los datasheet electrónicos y los valores de ganancia y offset aplicados en cada sensor.

Cada sensor tendrá su propio datasheet electrónico en el que se almacenarán variables como resistencias, temperatura, niveles de luz, coeficientes de polinomios de aproximación. Algunas de éstas serán variables enteras y otras reales y tendrán distintos rango de variación. Se han definido 4 tipos de variables(char, short, int, real) que manteniendo una precisión suficiente consiguen ahorrar espacio frente a la definición de estas variables en el lenguaje C. En el anexo E se explica los tipos y la definición de estas variables.

3 RED INALÁMBRICA DE SENSORES

En este apartado de la memoria se explica el concepto de red inalámbrica de sensores (*Wireless Sensor Network*, WSN), se citan las características básicas de la WSN para la detección temprana de incendios desarrollada en el Grupo de Diseño Electrónico y por último se detalla cómo se integra el interfaz diseñado dentro de los nodos de dicha red.

3.1 INTRODUCCIÓN

Las WSN son un conjunto de nodos sensores que son capaces de obtener información del entorno y transmitirla mediante ondas electromagnéticas a otros nodos, de forma que la información llegue a una estación base donde pueda ser tratada y analizada. La principal característica de estas redes es que los nodos están distribuidos por el entorno, lo que conlleva que no tengan acceso a red eléctrica y por lo tanto tienen que ser alimentados por baterías. Así una de las principales pautas en el diseño de una WSN es un bajo consumo para maximizar la vida útil de las baterías.

Actualmente las técnicas más utilizadas para la prevención y detección de incendios están basadas en imágenes de satélites meteorológicos o en la información obtenida por los puestos de guardas forestales. Estas técnicas no nos aportan información local, que puede ser relevante para prevenir y detectar los incendios forestales, algo que es factible con WSN. Las causas más comunes de incendios forestales son las tormentas eléctricas, el calor extremo y sequedad del suelo. Éstas pueden ser detectadas por sensores localizados dentro de los nodos de la red que midan localmente parámetros ambientales como humedad relativa, temperatura, luminosidad, humo, etc. Esta es la motivación que existe detrás del proyecto del GDE [6] para la implementación de una WSN para la detección temprana y prevención de incendios forestales.

3.2 ESTRUCTURA DEL NODO

Las WSN están formadas por un conjunto de nodos, que deben tener capacidad de poder obtener información de parámetros ambientales y de transmisión de esta información.

Un nodo consta de los siguientes componentes:

- Un microcontrolador, responsable de controlar y sincronizar la adquisición de los datos de todos los sensores, de preparar la información a enviar y de gestionar los recursos del nodo.
- Un transceptor Xbee, que opera a 2,4 *Ghz*, cumpliendo el estándar 802.15.4.
- Una fuente de alimentación compuesta de dos pilas AA que proporcionan 3 voltios.
- Una antena tipo dipolo que proporciona una cobertura de alrededor de 100 metros.
- Un conjunto de sensores con su adecuada electrónica de acondicionamiento. Entre ellos destacan sensores de humedad, presión, intensidad luminosa, humo, temperatura, etc.

En la siguiente figura 16 se observa la PCB diseñada, en la que se distingue el microcontrolador, el transceptor y los conectores en donde se colocan los sensores.



Figura 16: PCB del nodo sensor

3.3 TOPOLOGÍA DE LA RED

La red diseñada sigue con la filosofía de las redes de área personal inalámbricas y de baja tasa de transmisión de datos (LR-WPAN), especificadas por el estándar IEEE 802.15.4[7]. En el estándar se describe el nivel físico (PHY), el nivel de enlace y el control de acceso al medio (MAC). El estándar es abierto a dos topologías de red diferentes, redes en *estrella* y *peer to peer*. A su vez las redes *peer to peer* pueden tener topologías en malla o en árbol. Las redes en estrella tienen como ventaja su sencillez, bajo consumo y pequeña latencia de los mensajes, su principal desventaja es que sólo llegan a cubrir decenas de metros. Las redes peer to peer permiten cubrir distancias mayores (cercanas al kilómetro), pero el consumo y la latencia son mayores debido a las retransmisiones en los nodos intermedios.

La topología de red elegida es *peer to peer* en malla. Podemos distinguir 2 tipos de nodos: nodo coordinador y los nodos FFD(Full Functionality Device). El nodo coordinador es el que se encarga de recibir los datos del resto de nodos de la red, está conectado vía USB con el PC central desde donde se procesa toda la información. El resto de nodos son FDD, esto significa que tienen capacidad tanto para enviar los datos de sus sensores hacia la red como para la recepción y retransmisión de los datos de otro nodo, lo que permite que la información fluya a través de la red hasta llegar al nodo coordinador.

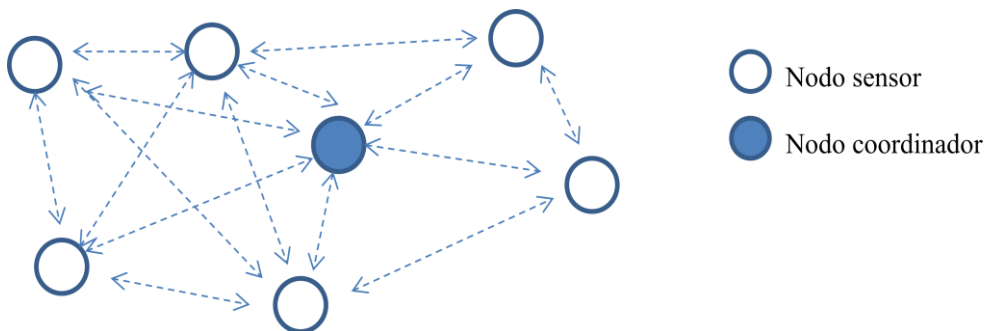


Figura 17: Topología peer to peer en malla.

Un parámetro fundamental en el diseño de una WSN es el ciclo de trabajo o *duty cycle*. El ciclo de trabajo es el porcentaje de tiempo que el nodo está activo respecto del total.

Con ciclos de trabajo pequeños conseguiremos que la vida útil de la batería sea mucho mayor. En nuestro caso el ciclo de trabajo es del 0.3%, lo que supone que el nodo sólo está activo 2 segundos cada 10 minutos. El nodo coordinador es el encargado de sincronizar a todos los nodos, configurando todos los transceptores para que cada 10 minutos los nodos se despierten y envíen la información sobre las lecturas de los sensores al nodo coordinador. Actualmente éste está conectado a un PC, donde se produce el tratamiento de los datos y la monitorización de los parámetros ambientales para la prevención y detección de incendios forestales.

3.4 INTEGRACIÓN DEL INTERFAZ EN LA RED

Una vez diseñado el interfaz, el objetivo final del proyecto es integrarlo en un nodo de la WSN y comprobar su funcionamiento. El protocolo de comunicaciones entre el interfaz y el nodo es I2C, anteriormente explicado. El nodo realiza la función de maestro, mientras que el interfaz se convierte en el esclavo del protocolo. Para ello se ha tenido que programar al microcontrolador del nodo, de forma que tenga funcionalidad de maestro I2C compatible con el interfaz: de esta forma el nodo es capaz de escribir y leer de cualquier dirección de memoria del interfaz y de enviar los comandos presentados en el apartado 2.2.3 de la memoria.

Otro objetivo del proyecto es que el interfaz sea *plug&play* con el nodo sensor, es decir, que detecte que el dispositivo se ha conectado y que automáticamente se envíen los *datasheet* electrónicos de la NTC y del sensor conectado en el interfaz, así como sus medidas. Para ello, el microcontrolador del nodo sensor (un Atmega 1281 de Atmel) configura como entrada y con resistencia de *pull down* el pin de datos que utiliza para la comunicación I2C con el interfaz en sentido esclavo-maestro (SDAI). El micro del interfaz configura ese pin como salida y con un valor de 1 lógico. De esta forma si el interfaz no está conectado, el micro del nodo tiene un valor lógico a su entrada de 0. Al conectar el interfaz se detecta un cambio de 0 a 1 lógico en el micro del nodo, que indica que el interfaz se ha conectado.

Con todo lo anteriormente comentado el sistema final funciona como se indica a continuación. El nodo coordinador es el que gestiona y sincroniza el resto de nodos de

la red, cada 10 minutos éste activa al resto de nodos para obtener las medidas de los parámetros ambientales de cada nodo y enviarlas al PC, esto se denomina ciclo de trabajo. En los ciclos de trabajo en los que el interfaz esté desconectado, los nodos no envían información de este ya que conocen que el interfaz no está activo. Si conectamos el interfaz, en el primer ciclo de trabajo el nodo sensor envía al interfaz los comandos *Parámetros NTC* y *Parámetros sensor* por los que obtiene los *datasheet* electrónicos, después envía los comandos *Configuración NTC interfaz* y *lectura NTC* con los que obtiene la medida de temperatura y por último envía *Configuración sensor interfaz* y *lectura sensor* obteniendo la medida del sensor colocado en el interfaz. En los siguientes ciclos ya no es necesario transmitir los *datasheet* electrónicos por lo que sólo se realizan los comandos necesarios para obtener la lectura de la NTC y del sensor. Como ya he comentado toda esta información se transmite, junto con el resto de información del nodo sensor, al nodo coordinador en cada ciclo de trabajo. En el anexo F se detalla el formato de la trama en la comunicación Xbee entre nodos de la red. Éste está conectado mediante un interfaz USB a un PC que es el encargado de convertir las lecturas enviadas por los nodos en valores de la magnitud física medida, todo gracias a la información guardada en el *datasheet* electrónico.

4 RESULTADOS

El principal hito del PFC fue el diseño del interfaz y su integración dentro de la WSN. Una vez comprobado su correcto funcionamiento se hicieron modificaciones en el diseño para conseguir que el interfaz sea lo más genérico posible. Para ello se aplicaron los sensores expuestos en el apartado 2.3, demostrando que el interfaz es compatible con sensores resistivos, con salida en tensión y en corriente y observando su correcto funcionamiento en el sistema final. Para caracterizar correctamente el interfaz es necesario proporcionar tanto los errores en las medidas de los sensores, como el consumo del interfaz. Por esto en los siguientes apartados se expone un análisis de los errores y del consumo del interfaz

4.1 ERRORES

En el diseño de un sistema de medida es necesario determinar el error en las medidas. En el caso del interfaz diseñado podemos dividir este error en dos, error de ajuste y error del sistema.

El error del sistema es la diferencia entre el valor de tensión a la salida de la etapa básica de acondicionamiento del sensor (plataforma) y el valor de tensión calculado en el PC, una vez que recibe la señal del nodo y compensa la ganancia y el offset que ha introducido el interfaz. Así este parámetro determina el error cometido por toda la electrónica del interfaz, por la conversión frecuencia-palabra digital del nodo sensor y por la conversión palabra digital-tensión del PC central.

Sensor	Error del sistema(v)	Error del sistema(magnitud física)
NTC	0,0202	0,5425 °C
Termopar	0,0218	10,241 °C
Humedad	0,017	< 1%
Hall	0,0057	22,86 μ m
LDR	0,0655	9,0809 lux
Fotodiodo	0,0118	35,826 lux

Tabla 1: Errores máximos del sistema.

En la tabla 1 se observan los valores máximos de error del sistema para cada uno de los sensores aplicados. La tercera columna contiene los valores de errores en términos de magnitud física del sensor, asociados a los errores en voltaje representados en la segunda columna.

Una vez que el PC realiza la conversión palabra digital-tensión, puede conocer el valor de la magnitud física del sensor a través de la relación entrada-salida del sensor que se guarda en su *datasheet* electrónico. El error de ajuste(E_a) es el error relativo cometido entre la verdadera relación entrada-salida y la que está representada, con un número limitado de parámetros, en el *datasheet* electrónico.

Sensor	E_a (%)
NTC	0
Hall	0,4941
Termopar	1,554
LDR	5,77
Fotodiodo	6,5755
Humedad	0

Tabla 2: Errores de ajuste máximos.

En la tabla 2 se observan los errores de ajuste máximos de todos los sensores aplicados. Los errores se muestran en porcentaje, por ejemplo el $E_a(\%)$ del termopar se puede interpretar de la siguiente manera; si queremos hacer una medida a 100°C tendremos como máximo un error de 1.554°C. Cabe resaltar que tanto para la NTC como para el sensor de humedad no existe error de ajuste. En el caso de la NTC, el fabricante nos proporciona la relación entrada-salida con un número pequeño de parámetros que son los mismos que guardamos en la memoria del interfaz, por lo que no existe error de ajuste. Como ya se comentó en el apartado 2.3.2, el *datasheet* electrónico del sensor de humedad posee el nombre del fichero que el PC central utiliza para obtener los valores

de humedad relativa, por lo tanto la relación entrada-salida proporcionada por el fabricante es la misma que la que finalmente se utiliza, así el error de ajuste es 0.

4.2 CONSUMO

El consumo es un parámetro importante en el diseño del interfaz, ya que es crítica la duración de las baterías en los nodos de la WSN.

El consumo se ha medido poniendo una resistencia de $10\ \Omega$ en serie entre el nodo y el interfaz, en la línea de alimentación. Con el osciloscopio TDS210 de Tektronix se mide la caída de tensión en dicha resistencia, que es proporcional a la intensidad que el nodo entrega al interfaz. Los valores capturados por el osciloscopio se mandan a un PC, vía GPIB, para su análisis. Así una vez conocida la intensidad(I), la potencia consumida(P) se puede calcular con la ecuación 5.

$$P = V \cdot I \quad (5)$$

Donde V es la tensión de alimentación (3.3 v). El consumo se mide sin colocar ningún sensor en el interfaz para que éste no dependa del tipo de sensor colocado.

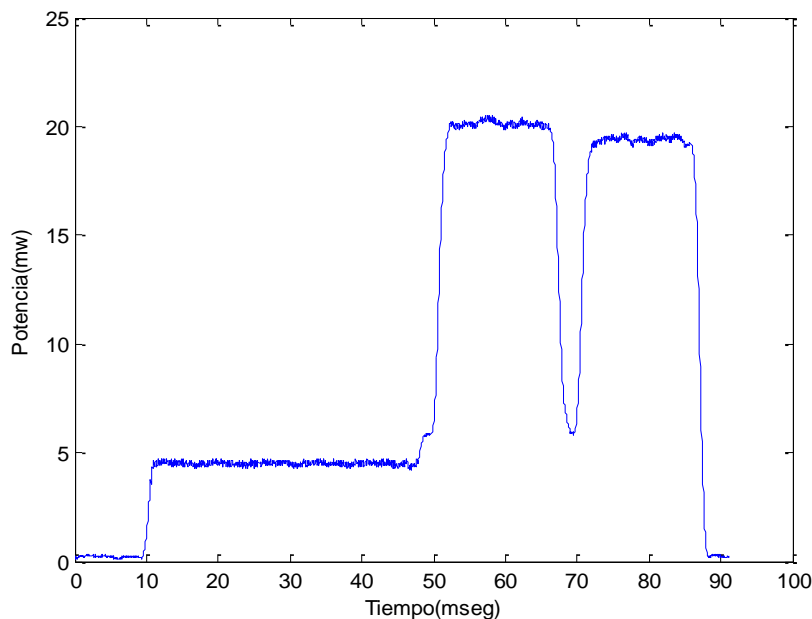


Figura 18: Potencia consumida durante el primer ciclo de trabajo

La figura 18 muestra el consumo del interfaz durante el primer ciclo de trabajo, es decir, la primera vez que el nodo sensor se despierta y detecta el interfaz conectado. Las fases de este primer ciclo son:

- Inicialmente el interfaz está en modo bajo consumo, donde la potencia disipada es aproximadamente $12\ \mu\text{W}$.
- Después el interfaz envía los *datasheet* electrónicos de la NTC y del sensor. En esta fase sólo está activo el micro en el interfaz, provocando un consumo cercano a 4.5mW .
- Posteriormente se ejecutan los comandos *configuración interfaz NTC* y *lectura NTC* para obtener la medida de la NTC. Durante el primero está activo el micro y los potenciómetros, consumiendo el interfaz cerca de $5.8\ \text{mW}$. Durante el segundo se activa toda la electrónica del interfaz, subiendo el consumo a los 20mW .
- Por último se ejecutan los comandos *configuración interfaz sensor* y *lectura sensor* para obtener la medida del sensor. Como antes en el primero se programan los potenciómetros digitales y el vuelve a estar entorno a $5.8\text{-}5.9\ \text{mW}$. En el segundo se vuelve a activar toda la electrónica del interfaz alcanzándose un consumo de 19mW , al que hay que añadirle el consumo del sensor que se quiera colocar en el interfaz. Una vez que se ejecutan estos dos comandos el interfaz vuelve al modo bajo consumo.

En el resto de ciclos de trabajo, el consumo del interfaz es aproximadamente el del primer ciclo, salvo que la segunda fase desaparece ya que no se vuelven a enviar los *datasheet* electrónicos.

Una forma de comparar el consumo del nodo y el consumo del interfaz, es calcular el porcentaje de consumo del interfaz respecto al consumo total del nodo. Los datos del consumo del nodo fueron proporcionados por mis compañeros del GDE, así pude calcular que el consumo del interfaz supone el 2.25% del consumo del nodo. Si hacemos la comparación respecto a la duración de las baterías del nodo, conectar el interfaz supone una reducción de 8 días y 4 horas de autonomía.

5 CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO

La inteligencia ambiental ha experimentado un gran desarrollo durante los últimos años, convirtiéndose, hoy en día, en un concepto de gran relevancia. Los sensores nos permiten medir magnitudes físicas del entorno, por lo que son el elemento básico de la inteligencia ambiental. Existen muchos tipos de sensores con esquemas de acondicionamiento diferentes, rangos de medida muy dispares, etc. Por todo esto es una buena aportación diseñar un interfaz compatible con diferentes tipos de sensores, que sea capaz de acondicionarlos, que posea sus características básicas y que se pueda conectar con una unidad de procesamiento externa(PC o nodo de WSN), creando *smart sensors* que minimicen la ayuda del usuario.

El diseño del interfaz es compatible con sensores resistivos, con salida en voltaje y corriente. La plataforma nos permite seleccionar el esquema de acondicionamiento básico adecuado para el sensor colocado. Después la señal de salida de la plataforma pasa por el bloque de ganancia, donde se amplía su rango de variación a $V_{DD}-0v$ para mejorar la precisión del sistema. Posteriormente se realiza una conversión tensión-frecuencia para eliminar las interferencias y los errores por pérdidas en los cables.

Toda la electrónica del interfaz es controlada por un micro de bajo coste, que también se encarga de las comunicaciones del interfaz con el exterior mediante el protocolo I2C. El micro es capaz de entender y ejecutar 6 tipos de comandos que le llegan del exterior: *parámetros NTC* y *parámetros sensor*, con los que se transfiere el *datasheet* electrónico del sensor y de la NTC; *configuración interfaz NTC* y *configuración interfaz sensor* para programar los potenciómetros digitales; *lectura NTC* y *lectura sensor* para devolver la señal digital con la información de la medida en la frecuencia.

Por último, el interfaz se ha integrado en un nodo de la WSN desarrollada por el GDE. Se ha comprobado el correcto funcionamiento con los siguientes sensores: hall, termopar, LDR, fotodiodo, humedad y NTC. Se han medido sus errores y el consumo del interfaz obteniendo una reducción de la autonomía del nodo de aproximadamente 8 días.

5.2 PROPUESTAS DE MEJORA

Aunque el PFC ha tenido buenos resultados y se han cumplido los objetivos de diseño iniciales, a continuación expongo algunas propuestas de mejora y de trabajo futuro.

Durante el diseño del interfaz toda la electrónica fue montada sobre *protoboard*, una vez que tenemos el diseño definitivo se propone el diseño de la PCB.

Los potenciómetros digitales del interfaz son lineales y de 256 pasos. El fabricante nos proporciona los valores de resistencia para cada uno de los pasos, pero con una incertidumbre elevada. En nuestra aplicación es crítico conocer los valores exactos de dichos potenciómetros, ya que de ellos depende el acondicionamiento básico, y las etapas de ganancia y offset variable. Por ello se propone como mejora un sistema de autocalibrado en el interfaz.

Actualmente en la WSN desarrollada por el GDE en cada ciclo de trabajo los nodos toman una sola medida de los sensores. Esto supone que el transceptor Xbee consuma más del 90 por ciento del consumo del nodo. Por ello se propone un análisis del consumo en función de la arquitectura[8] de red inalámbrica (Estrella, Mallada, Árbol jerárquico), los protocolos de encaminamiento utilizados, el protocolo de transporte desarrollado y la paquetización de la información teniendo en cuenta los requerimientos temporales. Para ello sería necesario caracterizar el consumo tanto de los nodos sensor como en los nodos de transporte. En esta misma línea también se propone el estudio mediante simulación de la escalabilidad del proceso para topologías con un número elevado de nodos

5.3 CONSIDERACIONES PERSONALES

En este último apartado voy a comentar la experiencia personal vivida en la realización del proyecto y una valoración personal del mismo.

En cuanto a la experiencia personal he de remarcar que lo más complejo fue el inicio del proyecto. El proceso comienza cuando te planteas que es el momento de iniciar el PFC. Lo primero es encontrar un proyecto con una temática que encaje con tus gustos y con tu perfil, que en muchos casos puede convertirse en una tarea complicada. En mi caso, estaba realizando el postgrado en microsistemas e instrumentación inteligente, por ello entré en contacto con el GDE y ellos fueron los que me propusieron la temática del PFC. Una vez que elegí el proyecto el primer paso fue documentarme, estudiar trabajos en la misma línea y estudiar estándares. El segundo paso fue empezar a programar el microcontrolador, algo que en la carrera no había hecho, y además en lenguaje C del que no tenía demasiada experiencia. Esta segunda fase fue costosa y a partir de aquí pasé a diseñar el *hardware*, implementar el protocolo de comunicaciones, elegir los sensores y finalmente a integrar el interfaz en el nodo de la WSN.

La valoración personal del PFC es muy satisfactoria, creo que es un paso necesario para convertirte en un ingeniero, es el paso en el que se ponen en práctica todos los conocimientos adquiridos durante la carrera y el estudiante se acerca un poco más a lo que va a ser su futuro profesional.

6 PLANIFICACIÓN TEMPORAL

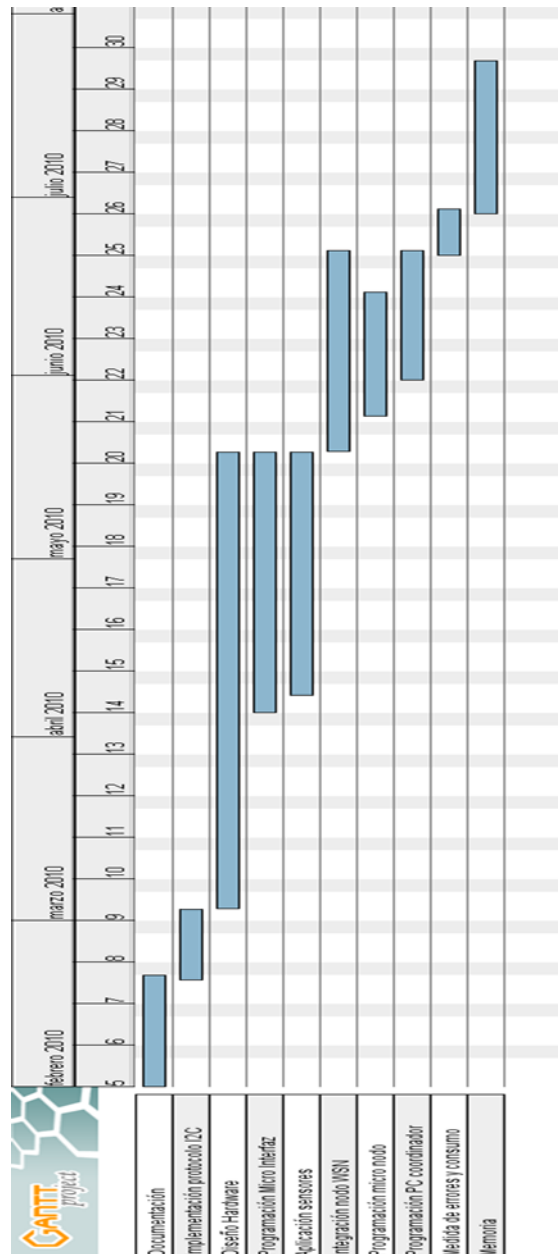


Figura 19: Diagrama de Gantt del PFC

7 BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES

- [1] John Mark, Paul Hufnagel, " The IEEE 1451.4 Standard for Smart Transducers" IEEE Standards association, Mayo 2004.
- [2] G. Meijer, "Smart Sensor Systems", Wiley, 2008.
- [3]G. Zatorre, N. Medrano, M.T. Sanz, P.A. Martínez, S. Celma, "Robust Adaptive Electronics for Sensor Conditioning", Proc. IEEE Sensors 2007, Atlanta (EE.UU.), octubre,2007.
- [4] S. Yurish, "Digital sensor design based on universal frequency sensors interfacing IC", Sensors and Actuators A 132 (2006) 265-270
- [5] Philips semiconductors, "The I2C-Bus especifications" Enero 2010.
- [6] A. Bayo, D. Antolín, N. Medrano, B. Calvo, S. Celma, "Development of a Wireless Sensor Network System for Early Forest Fire Detection" European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications, RFID-systech 2010. Ciudad Real , Junio 2010.
- [7] José A. Gutiérrez, Edgar H. Callaway, Raymond L. Barrett, " Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4" Standars Information Network IEEE Press, Enero 2007.
- [8] E.H. Callaway, "Wireless Sensor Networks, Architectures and Protocols", CRC Press, 2004.

8 ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IA	Inteligencia Ambiental
WSN	Wireless Sensor Network
TEDS	Transducer Electronic Datasheets
VFC	Voltage to Frequency Converter
I2C	Inter Integrated Circuit
NTC	Negative temperature coefficient
GND	Ground
LDR	Light Dependent Resistor
SCL	System Clock
SDA	System Data
ACK	Acknowledgement
NIST	National Institute of Standard and technology
PCB	Printed Circuit Board
LR-WPAN	Low-Rate wireless Personal Area Network
PHY	Physical
MAC	Medium access control